

---

# AVTOMATIZACIJA AEROTRIANGULACIJE IN AEROSNEMANJE

mag. Vasja Bric

Geodetski zavod Slovenije d.d., Ljubljana

Prispelo za objavo: 1998-08-24

Pripravljeno za objavo: 1998-10-16

## Izvleček

*Aerotriangulacija je eden od postopkov v fotogrametriji, ki so v kratkem razvoju digitalne fotogrametrije največ pridobili. Končni rezultat aerotriangulacije so metrični aeroposnetki (t.j. aeroposnetki z znanimi elementi zunanje orientacije). Ti v Sloveniji spet prihajajo v uporabo pri nekaterih pomembnih projektih, ki obsegajo celotno območje države. Kakovost aerotriangulacije je zelo odvisna tudi od aerosnemanja.*

**Ključne besede:** aerosnemanje, aerotriangulacija, avtomatizacija, ciklično aerosnemanje, Slovenija

## Abstract

*Aerial triangulation is one of the photogrammetric procedures which has progressed greatly in the short period of development of digital photogrammetry. The final results of aerial triangulation are metric aerial photos which are back in wide use in certain important Slovenian projects. Quality of aerial triangulation depends very much on the quality of aerial survey.*

**Keywords:** aerial survey, aerial triangulation, automation, cyclic aerial survey, Slovenia

## 1 UVOD

Aerotriangulacija je ena od bistvenih faz v procesu izdelave fotogrametričnih izdelkov. Je zaključena celota, če so cilj aerotriangulacije koordinate novozajetih točk, pa tudi končni izdelek. Aerotriangulacijo sestavljata dva zaporedna postopka: zajemanje podatkov za aerotriangulacijo in izravnavo. Avtomatizacija nas zanima predvsem v smislu zajemanja podatkov. Vhodni podatki za aerotriangulacijo so aeroposnetki v analogni ali digitalni obliki in oslonilne ter kontrolne geodetske točke, ki so izmerjene na terenu, ter podatki o kakovosti teh podatkov. Rezultati aerotriangulacije so koordinate veznih točk ter koordinate perspektivnih centrov za posamezen posnetek, ki je sodeloval v aerotriangulaciji, ter rotacijski koti okoli posameznih osi koordinatnega sistema (t.j. elementi zunanje orientacije posnetkov) in podatki o kakovosti elementov zunanje orientacije. Načrtovanje aerotriangulacije se začne prej, kot so pripravljeni vhodni podatki. Začne se z načrtovanjem

aerosnemanja in določanja približnih položajev oslonilnih in kontrolnih točk. Več o teh fazah bomo izvedeli v nadaljevanju. Aerotriangulacija ni sama sebi namen in se uporablja kot faza pri izdelavi vseh fotogrametričnih izdelkov, kot so npr. izvrednotenje aeroposnetkov za izdelavo načrtov/kart ali za potrebe polnjenja baz GIS-ov, izdelave ortofoto kart, izvrednotenje bližnjelikovnih posnetkov ipd. V članku bo aerotriangulacija obravnavana kot faza kartografskih aplikacij.

## 2 ZGODOVINA AEROTRIANGULACIJE

Razvoj aerotriangulacije je bil tesno povezan s tehnološkim razvojem v smislu analognega in digitalnega računanja. Razlikujemo lahko štiri glavne dobe razvoja aerotriangulacije. Začetek aerotriangulacije sega v leto 1910 (Zwintzsch, 1988), ko se začne z geodetskimi rešitvami fotogrametričnih problemov kot radialna aerotriangulacija, ki je trajala 50 let. Zelo uspešna metoda je bila mehanska rešitev radialne triangulacije z začetkom leta 1935. Grafična rešitev (1930) pa se je večinoma uporabljala zunaj topografskega kartiranja. Numerična metoda, ki se je začela približno istočasno kot grafična, se zaradi počasnega računanja ni uporabljala za kartiranje v večjih merilih. Drugo obdobje razvoja aerotriangulacije kaže filozofijo v tem času (1930 – 1970). Prostorska pasovna triangulacija je rekonstruirala pas na analognem instrumentu (metoda aeropoligona). Podatki so bili spremenjeni v numerično obliko v procesu čim kasneje. Pas je bil z enostavnimi matematičnimi formulami transformiran v terenski koordinatni sistem z uporabo grafičnih popravkov površine (Zarzicky), mehaničnih popravkov in z uporabo polinomov druge in tretje stopnje. Okoli leta 1960 je bil narejen prehod iz pasovne v blokovno izravnavo. Najprej je bil uporabljen za blok pasovni poligon (Schut). Od leta 1965 se je filozofija hitro spreminjala. Z razvojem digitalnih računalnikov naj bi se analogni podatki v procesu aerotriangulacije čim prej spremenili v digitalne. Aerotriangulacija se je z metodami izravnave neodvisnih modelov in s snopi zelo razvila. V začetku 90. let pa se je začela doba digitalne aerotriangulacije, ki se od prejšnje razlikuje predvsem po načinu zajema podatkov za aerotriangulacijo in z uvajanjem globalnih položajnih sistemov (GPS) v aerosnemanje za potrebe določevanja parametrov zunanje orientacije aeroposnetkov.

## 3 KRATEK RAZVOJ AEROTRIANGULACIJE NA GEODETSKEM ZAVODU SLOVENIJE

Prva aerotriangulacija se je na Geodetskem zavodu Slovenije izvedla v začetku 70. let za tehnične načrte pri gradnji cest. Uporabljen je bil univerzalni fotogrametrični instrument Wild z registratorjem modelnih koordinat na papirnat luknjan trak. Papirnat trakove so nato prebrali v računskem centru, kjer je bila izvedena tudi prva izravnava. Vezne točke so prenašali izurjeni operaterji s posnetka na posnetek na instrumentu PUG. Podatki za aerotriangulacijo so se proti koncu 80. let še vedno zajemali na analognih instrumentih, vendar registrirali neposredno na prve osebne računalnike. Zajeti podatki so bile modelne koordinate fotogrametrično zajetih točk. Na teh računalnikih smo izvajali tudi izravnave po metodi neodvisnih modelov, kar je pri računanjih prineslo pravo majhno revolucijo v primerjavi s prejšnjim dolгим procesom izravnave.

Ko smo ob koncu leta 1993 na Geodetskem zavodu Slovenije kupili moderno digitalno fotogrametrično postajo, v sklopu katere je bil tudi skaner z možnostjo monokomparatorskega zajema slikovnih koordinat oslonilnih, kontrolnih in veznih točk, je aerotriangulacija dobila nov zagon pri izdelavi digitalnih ortofoto načrtov in tudi pri ostalih fotogrametričnih projektih. Prvič smo izravnave izvajali po metodi s snopi. Na Geodetskem zavodu Slovenije smo konec leta 1994 kupili prvi analitični instrument Leica SD2000, ki ga prav tako uporabljamo za potrebe zajema za aerotriangulacijo (Leica, 1994). Izravnave izvajamo na osebнем računalniku z operacijskim sistemom UNIX v sklopu digitalne fotogrametrične postaje. Najnovejše digitalne fotogrametrične postaje nam danes omogočajo avtomatsko notranjo orientacijo aeroposnetkov in avtomatski zajem slikovnih koordinat veznih točk za aerotriangulacijo, ustrezni programski paketi pa tudi izračun izravnave.

#### 4 AEROSNEMANJE ZA POTREBE AEROTRIANGULACIJE

##### 4.1 Kakšno aerosnemanje potrebujemo za kartografske aplikacije

Aerosnemanje, določanje oslonilnih in kontrolnih točk in aerotriangulacija naj bi bili prilagojeni končnemu izdelku. Če je fotogrametrični izdelek dobro opredeljen (t.j. standardizirana planimetrična in višinska natančnost, podrobno opredeljena vsebina zajema in določen glavni namen uporabe izdelka), so tudi zahteve za aerosnemanje lažje določljive. Če je npr. glavni namen projekta kartiranje, potem sta položajna in vsebinska natančnost zelo pomembni in naj bi aerosnemanje načrtovali v času nezalistanosti.

##### 4.2 Katera aerosnemanja so najpogostejša

V Sloveniji so se aerosnemanja v zadnjih nekaj letih izvajala predvsem v merilu 1 : 17 400 in 1 : 8 700 za ciklično aerosnemanje Slovenije, ki se uporablja v različne namene. Vsa aerosnemanja, ki niso ciklična, so posebna aerosnemanja. Najpogostejša posebna aerosnemanja so v merilu 1 : 5000 za izdelavo načrtov za potrebe gradnje avtocest v merilu 1 : 1000. Posnetki cikličnega aerosnemanja se uporabljajo za izdelavo digitalnih ortofoto načrtov (velikost najmanjšega slikovnega elementa na terenu je 0,5 m oziroma izris v merilu 1 : 5000), za reambulacijo TTN 5, TTN 10 in TK 25 ter za fotogrametrično digitalizacijo podatkov o stavbah in drugih objektih za potrebe registra stavb.

##### 4.3 Vpliv parametrov aerosnemanja na kakovost posnetkov

Za aerosnemanje je poleg ostalih treba določiti še naslednje parametre (Backhouse, 1974):

- ☐ tip filma (je eden od odločilnih materialov za kakovost),
- ☐ merilo snemanja (močno vpliva na število, ločljivost in interpretabilnost posnetkov),
- ☐ čas snemanja (vpliva na vpadni kot sonca),
- ☐ vpliv atmosfere (sparina je največji problem aerosnemanja, ki zelo vpliva na svetlost in kontrast posnetkov),
- ☐ letni čas snemanja (vpliva na vpadni kot sonca, vpliva na zalistanost gozda),
- ☐ vzdolžni in prečni preklap (neposredno vpliva na natančnost aerotriangulacije),

- ❑ goriščna razdalja kamere (večje goriščne razdalje zahtevajo večjo višino leta letala, dajejo slabšo višinsko natančnost aerotriangulacije, vpliva na kakovost slike),
- ❑ filtri (vplivajo na kakovost slike),
- ❑ pomik slike v času osvetljevanja posnetka (vpliva na kakovost slike),
- ❑ način snemanja (zvezni ali točkovni),
- ❑ dovoljeni nagibi letala (vpliva na uspešnost avtomatskega določanja veznih točk).

Vremenski pogoji pri aerosnemanju so za potrebe kartiranja še posebej strogi. Ko nastopijo ugodni vremenski pogoji, jih je treba izkoristiti do popolnosti, kar pomeni, da mora biti načrtovanje aerosnemanja dovolj zgodaj in temeljito. V primeru signalizacije pa mora biti aerosnemanje usklajeno z delom na terenu. Tudi če so vsi parametri za aerosnemanje idealni, so končni izdelki še vedno zelo odvisni od fotografskih postopkov.

## 5 DOLOČANJE OSLONILNIH IN KONTROLNIH TOČK

Signalizirane oslonilne točke povečujejo natančnost aerotriangulacije. Če projekt stroškovno ne prenese signalizacije, čeprav naj bi bila to pri topografskem kartiranju prej izjema kot pravilo, to pomeni, naj se signalizira vsaj nekaj najpomembnejših vogalnih točk bloka, se na terenu izberejo detajli, ki se jim določijo koordinate. Oslonilne točke so točke, ki so določene na terenu in so prepoznane na aeroposnetku ter jih vključimo v izravnavo aerotriangulacije. Število oslonilnih točk se z uvajanjem kinematičnega GPS-ja in določanjem koordinat perspektivnih centrov v aerosnemanju zmanjšuje. Oslonilne točke, ki imajo vse tri koordinate, naj bodo le po robu bloka, in to tem gosteje, čim večja planimetrična natančnost je zahtevana. Znotraj bloka so dovolj samo točke z višinami. Kontrolne točke so točke, ki so na terenu signalizirane (najbolje je izbrati točke iz baze geodetskih točk čim višjega reda ali ekscentre teh točk) ali pa so izbrani terenski detajli in jih ne uporabimo v izravnavi, kar nam omogoča, da jih uporabimo za objektivno določanje natančnosti aerotriangulacije. Kontrolne točke naj bodo enakomerno porazdeljene znotraj bloka.

## 6 AVTOMATIZACIJA AEROTRIANGULACIJE

V zadnjem času so bili razviti ali izboljšani nekateri postopki v prid hitrejšega in kakovostnejšega določanja parametrov zunanje orientacije (ASPRS, 1996):

- ❑ uporaba kinematičnega GPS-ja pri navigaciji in bolj natančnem vodenju načrtovanega aerosnemanja
- ❑ uporaba kinematičnega GPS-ja pri natančni določitvi koordinat perspektivnega centra
- ❑ uporaba GPS-ja pri določevanju oslonilnih in kontrolnih točk za potrebe aerotriangulacije
- ❑ avtomatizacija kalibracijskih procesov skaniranja aeroposnetkov
- ❑ izboljšava skaniranja negativnih črno-belih in barvnih posnetkov
- ❑ dodatki za nenadzorovano skaniranje aeroposnetkov iz originalnega zvitka filma
- ❑ avtomatizacija notranje orientacije
- ❑ avtomatizacija določevanja veznih točk iz digitalnih posnetkov
- ❑ polavtomatsko določanje slikovnih koordinat oslonilnim in kontrolnim točkam

- robustnost izravnave blokov z metodo s snopi ter uvajanje dodatnih parametrov in GPS-ja merjenih koordinat projekcijskih centrov
- hitro odkrivanje morebitnih napak v blokovni izravnavi.

## 7 UPORABA AEROTRIANGULACIJE NA GEODETSKEM ZAVODU SLOVENIJE, D.D.

Danes na Geodetskem zavodu Slovenije vse fotogrametrične projekte začnemo z aerotriangulacijo, razen v primeru, če so elementi zunanje orientacije že poznani ali obstajajo skice in koordinate veznih točk za vsak stereomodel posebej. Aerotriangulacijo lahko izvajamo na treh fotogrametričnih instrumentih: analitičnem instrumentu, digitalnem polavtomatskem monokomparatorju in digitalni fotogrametrični postaji. Prva dva instrumenta kot vhodne podatke uporabljata analogne posnetke, medtem ko zadnji uporablja skanograme aeroposnetkov. Tako se lahko lažje prilagajamo zahtevam različnih projektov. Večina zajema za aerotriangulacijo poteka na digitalnem polavtomatskem monokomparatorju, s katerim imamo tudi največ izkušenj in ni treba poskanirati celotnega (t.j. skupaj z robnimi križi) aeroposnetka, kar omogoča, da skaniramo le potrebni del posnetka, to pa skrajšuje čas skaniranja in tudi trajanje nadaljnjih obdelav. Večino od zgoraj (glej točko 6) naštetih postopkov uporabljamo tudi na Geodetskem zavodu Slovenije. Predvsem postopek določanja oslonilnih in kontrolnih točk z GPS-jem. S tem načinom terenskega določanja točk smo izvedli vse aerotriangulacije za izdelavo DOF 5 od leta 1996 dalje. V začetku letošnjega leta smo začeli z uvajanjem digitalne fotogrametrične postaje, ki ga sestavlja računalnik s stereoočali (aktivna polarizacija) in fotogrametrični programski paket VirtuoZo. Digitalna fotogrametrična postaja omogoča poleg avtomatske notranje orientacije tudi avtomatsko določanje veznih točk in polavtomatsko določanje oslonilnih in kontrolnih točk. Ostale postopke naj bi uvedli s posodobitvijo aerosnemanja in skaniranja.

Razvoj digitalne fotogrametrije je poleg izdelave digitalnega modela reliefa in ortofota največ prinesel prav aerotriangulaciji. Vse digitalne fotogrametrične postaje naj bi omogočale zajem podatkov za aerotriangulacijo, kar je lahko ročno (t.j. točko po točko), polavtomatsko (t.j. posamezno točko na vseh posnetkih, kjer se pojavlja, avtomatsko) in avtomatsko (t.j. vse vezne točke avtomatsko najde na vseh posnetkih). Natančnost veznih točk je nekaj manjša od tistih, ki so bile zajete na digitalnem polavtomatskem monokomparatorju.

## 8 PERSPEKTIVE UPORABE AEROTRIANGULACIJE PRI NAS

Aerotriangulacija bo s povečanjem uporabe digitalnih sistemov še pridobila pomen in postala vedno bolj rutinska v fotogrametričnem procesu. Seveda pa ne smemo pozabiti, da je aerotriangulacija tesno povezana z aerosnemanjem in fotografskimi postopki. Uspešnost avtomatizacije aerotriangulacije pa je zelo odvisna tudi od kakovostnega aerosnemanja. V zadnjem ciklu cikličnega aerosnemanja je Geodetski zavod Slovenije na podlagi razvojne naloge Ciklično aerosnemanje 97 – 99 v ciklično aerosnemanje uvedel določene spremembe, kot so snemanje v blokih, ki naj bi bili bolj časovno homogeno posneti in enotne kakovosti, kot so bili v preteklosti (Jemec et al., 1998). Uporabniki cikličnega aerosnemanja dobijo večjo možnost metrične uporabe, kar je zelo pomembno tudi za geodete, saj v državi že

poteka nekaj projektov, kjer bomo več kot doslej uporabljali ciklično aerosnemanje v metričnem smislu.

Najbolj uveljavljen projekt je izdelava digitalnega ortofota z velikostjo slikovnega elementa na tleh 0,5 m in izrisa v merilu 1 : 5000, ki že pokriva 1/3 države. Največje težave projekta so v tem, da so razpisana območja preveč razdrobljena, kar povečuje stroške na list in onemogoča uveljavljanje prednosti bolj homogenega snemanja v blokih in signalizacijo, ki se prav zaradi tega ni uveljavila. Drugi večji projekt je register stavb, kjer se poleg stavb zajema tudi druga vsebina. Tretji projekt je gradnja temeljne državne karte, katere glavni namen je ustvariti digitalno bazo iz večinoma topografskih objektov ob pokrivanju celotnega območja države. Vsi trije projekti so povezani s kakovostjo aerosnemanja za metrične potrebe. Ena od osnovnih zahtev za aerosnemanje za potrebe teh projektov je, da se snemanje opravi v času, ko vegetacija najmanj ovira vidnost tal. Prednosti bi bile predvsem naslednje:

- natančnost aerotriangulacije bi se zaradi zanesljivejšega postavljanja veznih točk povečala in s tem tudi natančnost celotnega izvedenja,
- tudi natančnost avtomatskega določanja položaja veznih točk bi se izboljšala, kar bi vplivalo na povečano avtomatizacijo aerotriangulacije in zmanjšanje stroškov aerotriangulacije na posnetek,
- pri avtomatski izdelavi digitalnega modela reliefa, ki je stranski izdelek projekta DOF 5, v projektu TDK 5 pa eden od objektov topografske baze, bi dosegli večjo natančnost,
- zaradi boljše vidljivosti pri digitalizaciji stavb in drugih objektov bi bila hitrost in kakovost zajema podatkov večja,
- pri vseh fotogrametričnih topografskih kartiranjih bi dosegali večjo interpretabilnost aeroposnetkov.

## 9 ZAKLJUČEK

Uporaba aeroposnetkov v metrične namene je v vse večjem razmahu in se vrača v čase izdelave TTN, ko je fotogrametrija doživela svoj prvi razcvet pri nas. Prav aerotriangulacija je tista, ki aeroposnetke pripravi za metrično uporabo in prav gotovo spet dobiva svoje pravo mesto v fotogrametriji in avtomatizacija ga bo samo še utrdila. Predlog za spremembo aerosnemanja, ki bi bil lahko naslednji: aerosnemanje za potrebe kartografskih aplikacij naj bi snemali v črno-beli tehniki v spomladanskem času pred zalistanjem, za potrebe gozdarstva in kmetijstva pa v ustrezni barvi ali infrardeči tehniki, v merilu in času, primernem za njihovo najboljšo izrabo.

### Literatura:

- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Digital Photogrammetry – An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ZDA, 1996*
- Backhouse, D. G., Fundamentals of Aerial Photography, Enschede, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1974*
- Jemec, J. et al., Izvedbeni projekt CAS 97 – 99. Ljubljana, Geodetski zavod Slovenije d.d., 1998*
- Kraus, K., Photogrammetry – Volume 2, Advanced Methods and Applications. Dunaj, 1997*
- Krupnik, A., Multipl-patch Matching in the Object Space for Aerotriangulation. Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 1994*
- Leica, Navodila za uporabo analitičnega fotogrametričnega instrumenta. Leica SD2000, Ljubljana, 1994*

*Zwintzsch, Aerial Triangulation, Enschede, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1988*

*Recenzija: Mojca Kosmatin Fras  
mag. Janez Oven*